

# 傾きにより旋回曲率を操作する台車の提案と歩行ロボットへの応用

著者	熊谷 正朗, 玉田 薫
会議概要 (会議名, 開催地, 会期, 主催者等)	計測自動制御学会東北支部 第233回研究集会
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1204/00000374/">http://id.nii.ac.jp/1204/00000374/</a>

# 傾きにより旋回曲率を操作する台車の提案と 歩行ロボットへの応用

## A Truck with Variable Curvature Operated by its Inclination and Application to Walking Robot

熊谷正朗\*、 玉田 薫\*\*

KUMAGAI Masaaki\*, TAMADA Kaoru\*

\*東北学院大学, \*\*東北学院大学 大学院

\*Tohoku Gakuin University

キーワード： 歩行ロボット(Walking robot), 2脚ロボット(Biped robot), ローラーウォーカー(Roller-walk),  
台車(Truck), 曲率可変(Variable Curvature),

連絡先： 〒985-8537 宮城県多賀城市中央一丁目13-1 東北学院大学工学部 機械知能工学科  
熊谷正朗, Tel.:022-368-7358, Fax: 022-368-7070, E-mail: kumagai@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

### 1. はじめに

最近は様々なロボットが開発され、ヒューマノイドロボットにおいては平面のみならず軽度の傾斜や不整地といった環境にも対応できるようになりつつある。人間の形態を模して開発されたヒューマノイドロボットは、人間の生活空間への適応力が比較的高いと言われているが、現実には至っていない。その要因の一つとして脚移動の効率の悪さが考えられる。ヒューマノイドロボットの主な移動手段である脚移動は車輪移動に比べて速度が遅く、それでいて複数のアクチュエータを必要とするうえに頻りに回転方向を逆転するため効率が悪い。一方、利用環境の多くは車輪で十分移動可能な平坦地が多く、脚の必然性はそれほどない。それらの解決策として、脚と車輪を併用した移動機構が検討されている。

脚車輪併用型のロボットはいくつかの種類に分

類される。まず、ロボットの胴体そのものに脚とは別に車輪を取り付け、車輪を積極的に利用する手法がある<sup>1)</sup>。この方法では、ロボットの全荷重を脚で常時支える必要もなく、機動性も高いが、空間干渉を避けるために脚と車輪の配置が難しく、2脚歩行型のロボットではいまだ実施例が見られない。一方、ロボットの脚先に車輪を取り付ける手法があり、アクチュエータを持つ能動車輪を用いる場合と、持たない受動車輪を用いる場合がある。能動車輪を用いた方が圧倒的に操作性は良くなるが、一般に脚ロボットは脚の慣性モーメントをいかに小さくするかが重要であり、脚先に敢えてアクチュエータを置くと歩行への悪影響が大きい。一方、ローラースケートのように受動車輪を用いる場合はたいした質量増加もなく、歩行への制約も少ない。

受動車輪を脚先に取り付け、歩行と車輪移動を実現したロボットとしてはローラーウォーカー<sup>2)</sup>

が知られている．これは4脚ロボットの脚先に受動の車輪を取り付け、各脚の運動によって車輪に推進力を発生させたものであり、直線移動のみならず、曲線移動や超信地旋回なども実現している．

一方、2脚型のロボットでも同様な試みがあり、足の代わりにインラインローラスケートを取り付けたロボットによる試み<sup>3)</sup>や、小車輪の薄型台車によるローラスケートを足裏に取り付けたロボットがある．ただし、これらは、4脚のローラーウォーカーと比較して動作の制約が大きい．4脚の場合は4輪が独立した自由度を持つため操作性が高いことに対して、2脚の場合は姿勢の維持のために1本の脚先に2個以上の車輪を取り付けており、結果的に足はその車輪に沿った直線上に運動が拘束される．そのため、方向転換には脚の上下か、路面との摩擦を無視して滑らせる必要がある(実際には、4脚のローラーウォーカー<sup>2)</sup>も自由度の制約から滑らせることが前提となっている)．また、従来の2脚型の試みでは車輪と歩行の遷移は車輪の取り外しによるなど、両立が考えられていない．

以上のような背景のもと、本研究では2脚歩行ロボットによる、より実用的なローラーウォークの実現を試みた．そのために、脚先に装着する台車機構を新たに考案した．この台車機構は、足首関節などでその傾斜を操作することにより、台車の拘束線の曲率を自在に変更できる．そのため、車輪を滑らせることなく、自由に曲線上を移動させることが可能であり、無理なくローラーウォークが実現できる．

本論文では、開発した台車機構の構造、原理とその解析についてまず述べる．ついで実際に歩行ロボットへの適用として、直線および曲線移動の方法と実験について報告する．

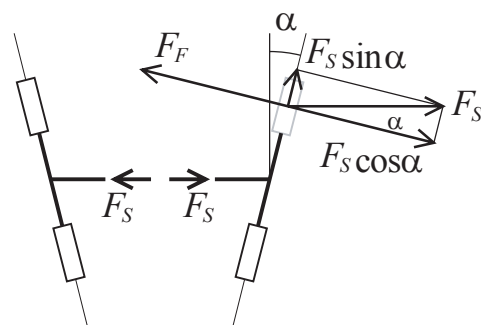


Fig. 1 脚の開閉による前進動作の原理．左右の車輪を八の字におき開閉すると前後方向に推進力が生じる．

## 2. 車輪による移動の原理

### 2.1 ローラーウォーク

移動には広瀬らによるローラーウォーク<sup>2)</sup>、日向野らの手法<sup>3)</sup>と類似の案を利用することとした．この手法には以下のような特徴がある．

- 脚先に受動の車輪を装着するのみであり、駆動は本来の脚の関節の運動によって行うため、脚部への機構的・重量的な追加負担が少ない．
- 全脚支持状態での運動を前提としているため、片脚スケータリング等に比較して安定性が高く、また姿勢制御などが不要である．
- 比較的周期の長い運動で長い距離を移動できるため、エネルギー効率が良いと考えられる．

移動の基本的な原理をFig. 1に示す．図は上面図(水平面内の図)である．ここでは簡単のため、車輪は4輪とし、2脚ロボットの両足に2個ずつの車輪を車軸が平行になるように取り付けている．すなわち、それぞれの足の車輪が滑り無く移動する場合、その軌道は直線となる．足先が各々角度 $\alpha$ だけ開くように方向を固定し、ロボットを基準に足を左右に広げると、前進方向に推進力が発生する．足を左右に広げるための力 $F_S$ は、車輪の軌

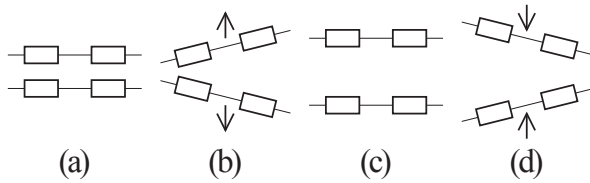


Fig. 2 移動の手順．足の方向を変えつつ，足の開閉を行う．

道の直線に対して図のように分解される．軌道直線に垂直な成分  $F_S \cos \alpha$  は，摩擦が十分であれば摩擦力  $F_F$  によって支持される．軌道に沿った成分  $F_S \sin \alpha$  は，全体を前進させる推力となる(車輪が転がる)．ここでは，力に着目したが，幾何学的な観点では，足を開く距離を  $\tan \alpha$  で除した距離だけ前後に移動する．

しかし，実際には，足を恒常的に広げ続けることは不可能であり，Fig. 2 に示すように，足先を開いた状態で足を広げる動作(b)と，足先を閉じた状態で足を狭める動作(d)を交互に行う必要がある．本来，車軸を固定した台車では，向きを変えるためには一度持ち上げるか，摩擦を無視して無理に変える必要があるが，その過程で現れる(a)や(c)の平行状態では推進力は全く得られず，摩擦の損失などもあって失速する上，効率も悪くなる．4脚ロボットによるローラーウォークでは，そもそも4輪が独立した脚に付いており，向きの遷移を滑らかに行うことが可能である(ただし文献<sup>2)</sup>でも軌道追従は完全ではなく，滑りが前提になっている)．しかし，既存の2脚ロボットによる試みでは，十分な解決はなされていないと考えられる．

この問題を解決するには，各足の車輪が無理なく曲線軌道上を移動できるようにすればよい．現状では直線移動のみであり，曲率0(旋回半径 $\infty$ )であるので，これを可変とできれば2脚のみでローラーウォークを実現できる．そのための機構について，以下論じる．

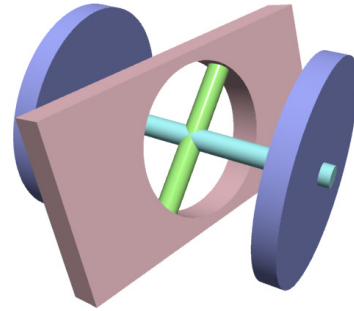


Fig. 3 車軸まわりの模式図．斜めに支持された十字の軸に車輪が取り付けられている．

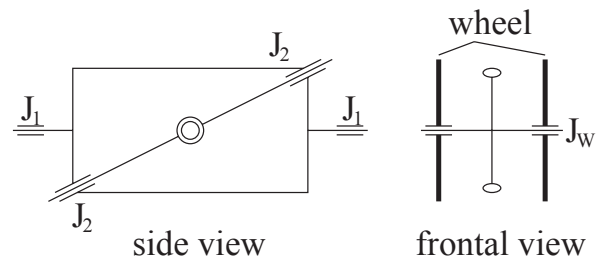


Fig. 4 車軸まわりの機構図． $J_1$  は操作する回転軸， $J_2$  は自由に回転する支持軸， $J_W$  は車輪支持部である．

## 2.2 傾きにより旋回曲率を操作する台車

以下では，まず台車を構成する，車輪支持部分について述べ，次いでその組み合わせによる台車について述べる．

### 2.2.1 傾きにより車軸の向きを変える機構

本機構は，車軸の支持方法に特徴があり，模式図をFig. 3に，機構をFig. 4に示す．左図(side view)は側面図であり， $J_1$  は能動的に回転させる操作軸(足首関節等を使用)， $J_2$  は自由に回る支持軸である．中央の丸は車軸を表し，支持軸と直交している．右図(frontal view)は正面図であり，先ほど丸印で表されていた車軸は水平の線となり，その両端に車輪を取り付ける．車輪は軸受  $J_W$  によって支持され，独立に自由に回転する(車軸が回るわけではなく，車軸は支持軸と一体である)．

この機構の動作の概要をFig. 5に示す．図におい

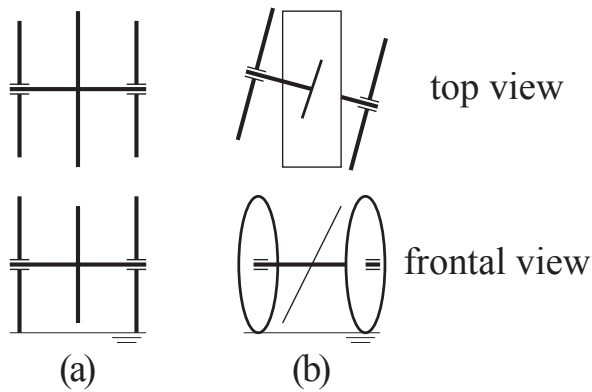


Fig. 5 動作の概要 . (a)全体を鉛直に保ち , 車軸は真横を向いている状態 . (b)全体を傾けたことで , 車軸の向きが変わった状態 .

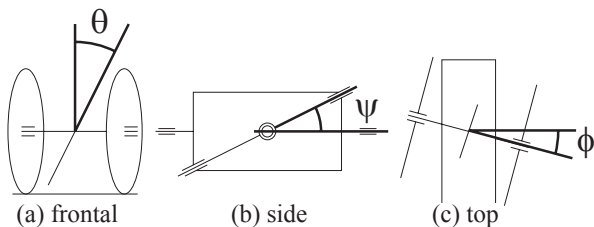


Fig. 6 角度の定義 .  $\theta$ は操作軸による傾斜角 ,  $\psi$ は支持軸の水平との角度 ,  $\phi$ は車軸の角度変化である .

て , (a)は機構全体を鉛直に保った場合 , (b)は操作軸  $J_1$ の回転によって傾けた場合で , 下が正面図 , 上が上面図である . 鉛直にした場合(a) , 車軸は操作軸にも垂直となり , 一般的な車軸の取り付け方と相違ない . それに対して , 傾けた場合(b) , 傾ける角度に応じて車軸の方向が変わる(b-上図) . 詳細は後述するが , 車軸の向きを変えることで旋回の曲率を操作できるため , 台車の傾き操作だけで旋回を制御できることになる . これが本手法の特徴である .

以下 , Fig. 6 , Fig. 7をもとに解析する . ただし , 車輪は水平面上に接しているものとする .

まず , 解析で使用する角度を Fig. 6で規定する .  $\theta$ は操作軸による傾斜角であり , 鉛直時に0とする . この角度を操作する .  $\psi$ は支持軸の水平との角度であり , 解析中は固定値とする . この角度によって傾斜角度と車軸の方向の変化係数が定まる .  $\phi$ は

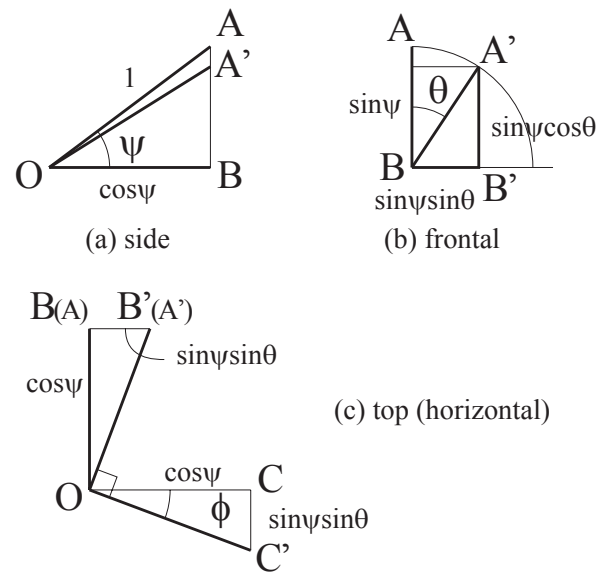


Fig. 7 解析のための図 . 英大文字は本文で参照される点 , 線上の式はその長さを表す .

車軸の角度変化であり , 台車の旋回曲率を決定する . これらの値は各々 , 図の変化方向を正とする .

まず , Fig. 7(a)(側面図)において , すべての軸が交わる点を  $O$ とし , 傾斜角度  $\theta = 0$ の際の支持軸の向きを表す線分を  $OA$ とする .  $A$ から操作軸に引いた垂線の交点を  $B$ とする .  $\overline{OA} = 1$ とした場合 ,

$$\overline{OB} = \cos \psi, \quad \overline{AB} = \sin \psi \quad (1)$$

である .

全体が角度  $\theta$ だけ傾いた状態では , Fig. 7(b)に示すように , 点  $A$ は  $OB$ を軸に回転し ,  $A'$ となる . このとき ,  $A$ から  $OB$ を含む水平面に垂線を降ろした交点  $B'$ について ,

$$\overline{A'B} = \overline{AB}, \quad \overline{BB'} = \sin \psi \sin \theta \quad (2)$$

である .

さて , 車軸は Fig. 5にも示すように , 車輪で支えられているため , 路面(水平面)に常に平行である . 一方 , 車軸と支持軸は直交している . 直交する線的一方が水平面内にあるため , それらの直交性は鉛直成分を無視して論じることができる . 一般に3次元での直交を示すには , その方向ベクトルの内積がゼロになればよいが , 一方の鉛直成分が

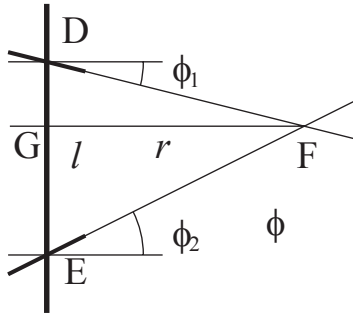


Fig. 8 台車の幾何学モデル．前述の車軸機構をD,Eの2点に装備する．

ゼロであるため，結果的に残り2成分，すなわち水平方向成分のみが内積に寄与するためである．

以上を元に，Fig. 7(c)で車軸の方向を検討すると，車軸の方向OC'は先ほどの支持軸の水平投影線であるOB'と垂直になる．そのため $\angle BOB'$ と $\angle COC'$ は等しくなり，

$$\tan \phi = \frac{\overline{BB'}}{\overline{OB}} = \frac{\sin \psi \sin \theta}{\cos \psi} = \tan \psi \sin \theta \quad (3)$$

を得る．

これは $\tan \phi$ が $\tan \psi$ を比例係数として $\sin \theta$ で操作できることを意味する．特に， $\theta$ ， $\phi$ がある程度小さい場合は，傾斜角 $\theta$ と車軸方向 $\phi$ がほぼ比例することを意味する．また， $\psi$ によってその程度を変えられる．たとえば， $\psi = 0$ の場合，機構からも自明であるが，傾斜によって車軸の方向は変わらない． $\psi$ を大きくするほど，少しの傾きで大きく車軸の方向を変えられるようになる．さらに， $\psi < 0$ ，すなわち支持軸を逆方向に傾ければ， $\phi$ の方向を逆にすることもできる．ただし，実際には， $|\psi|$ が60[deg]を越えると変化が急激になりすぎ，実用には適さなくなった．

### 2.2.2 曲率可変台車

上述の機構を2個組み合わせることで台車を構成する．台車の運動の瞬間的な中心は，2本の車軸の交点であり，そこまでの距離を旋回半径，その逆数を旋回曲率と呼ぶ．

Fig. 8に上面図を示すように，D,Eの2個所に2軸の原点が一致するように車軸を配置する．同一の操作軸に固定することとし，それぞれの支持軸の傾き $\psi_1, \psi_2$ によって，

$$\tan \phi_1 = \tan \psi_1 \sin \theta, \quad \tan \phi_2 = \tan \psi_2 \sin \theta \quad (4)$$

となったとする．図ではお互い逆方向に車軸が傾いている( $\phi_1 > 0, \phi_2 < 0$ )ため， $\psi_1, \psi_2$ は逆負号である．

車軸の原点D,E間の距離を $l$ ，台車から旋回中心までの距離(Gの旋回半径)を $r$ とし，幾何学的に解析する．

$$\begin{aligned} l &= \overline{DG} + \overline{EG} = r \tan \phi_1 + r \tan(-\phi_2) \\ &= r(\tan \psi_1 - \tan \psi_2) \sin \theta \end{aligned} \quad (5)$$

ここで，機構を対称にすると $\psi_2 = -\psi_1$ となり，

$$\begin{aligned} l &= 2r \tan \psi_1 \sin \theta \\ r &= l / (2 \tan \psi_1 \sin \theta) \\ (1/r) &= (2/l) \tan \psi_1 \sin \theta \end{aligned} \quad (6)$$

となる．これは，台車の傾斜角 $\theta$ がある程度小さいうちは，旋回の曲率が傾斜角にほぼ比例する，ということの意味する．

つまり，この台車はその傾斜角を操作するのみで，自在に曲率を変えられる．これは，台車の運動中の如何には制約されない．台車が停車しているときに傾斜を変更すると，車軸が傾くと同時にそれを支持する車輪も適宜その場で(各車軸の原点を中心に)回るため，台車自身の前後左右の並進運動は伴わずに曲率だけが変化する．運動中も随時傾斜角に連動して変化する．

ここでは簡単のために対称配置としたが，この場合はG点にも車軸を設けることができる( $\psi = 0$ )．一方，計算の簡単さは失われるが，非対称の配置でもかまわない．さらに， $\phi$ の負号を同一とした場合は，台車の前後離れたところに旋回中心をおけるなど，必要に応じて様々な設定が可能である．



よって、この台車を2脚ロボットの足に取り付け、足で描きたい軌道の曲率に応じてその傾斜角度を変えれば、無理なく曲線上を運動させることができる。

### 2.2.3 曲率可変台車の応用

本台車は“傾けるだけで曲率が変わる”という特徴を有する。そのため、本論文でのローラーウォークの他に以下のような応用事例が考えられる。

物体搬送用台車 たとえば、大きな合板を運ぶために、合板の前後下部にキャリヤとして装着する。板を垂直に押していけば直進し、向きを変えたい方向に傾けると軌道が曲がる、といった運用が可能。

2脚ロボットのスケータリング 本研究では実現していないが、1脚のみのスケータリングも可能と考えている。台車の傾け具合で軌道を変更できるほか、台車を傾け、旋回半径を操作することでロボット全体に働く遠心力を操作できる。これにより姿勢制御ができると思われる。アイススケートのような動作の可能性がある。1自由度の倒立振子を試作し、滑走させ、短時間ではあるが、姿勢制御が可能であることを定性的には確認した。

受動型振り子電車 鉄道車両で乗り心地を改善するため、カーブにさしかかったところで傾ける振り子電車と呼ばれるものがある。以前は錘によって、近年はアクティブ制御によって実現されている。本台車は、“曲率を変えると傾きが変わる”という逆の動作も可能であり、線路に沿った台車の方向の変化を車体の傾きにするような機構に応用が考えられる。その際、 $\psi$ を駆動装置で変化させることで、程度も可変とできる(東北学院大学鈴木による発案)。

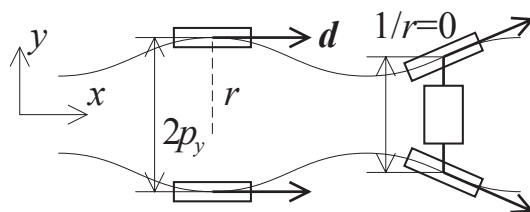


Fig. 9 台車の走行軌道。左右対称に脚の開閉を行うことで軌道上を進ませる。

### 2.3 曲率可変台車によるローラーウォーク

ローラーウォークは2.1節で述べたように、足先の開閉と左右方向への変位を組み合わせることで行う。これは足を左右に振幅をもつ波状軌道に沿わせて動かすことに他ならず、本研究ではFig.9に示すような正弦波軌道を採用し、直線移動をまずは試みた。

軌道は左右の足で対称であり、前進方向および横方向の変位 $p_x, p_y$ を

$$\begin{aligned} p_x(t) &= at \\ p_y(t) &= b \sin(t) + c \end{aligned} \quad (7)$$

とした。ここで、 $t$ は媒介変数であり、時間と同等の項である( $t$ を一定の割合で増加させればロボットは等速運動、 $t$ の加減速がそのままロボットの加減速となる)。また、 $a$ は進行速度を決める定数、 $b$ は左右変位の振幅、 $c$ は開脚量の基準値を決める。ロボットは動作とともに軌道に沿って進むため(ロボットの座標は $(p_x(t), 0)$ )、ロボットの座標系では $p_y$ だけが見えることになり、 $2p_y$ が歩隔となる。

足に取り付けられた台車が、この軌道上を運動するためには、三つの状態を操作する。第一に、台車の位置が $p_y(t)$ となるように操作する。これは単にロボットの脚先軌道に与えればよい(ロボットは脚先軌道や足の姿勢をもとに逆運動学を解いて動作する)。第二に、台車の方向を軌道の接線方向に向ける。台車自身は“曲率が変わる”ものであり、方向は別に考慮する必要がある。これもまた、ロ

ボットの脚軌道として、足先を接線方向に向けるように指令する。また別の観点では、曲率を操作することで路面に対して方向が変化する台車とロボットの整合性をとる操作である。第三に、台車の旋回曲率を軌道の曲率に一致させる。このためには台車を傾けるが、これもまたロボットの足裏の方向を適切に指示すれば良く、主に、足首のロール自由度によって操作される(ロール自由度は足の前後軸、すなわち台車の傾斜軸と平行である)。

以上の操作のため、軌道の接線方向と、曲率が必要となる。接線方向は

$$\mathbf{d}(t) = \left( 1 / \sqrt{\left( \frac{dp_x}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dp_y}{dt} \right)^2} \right) \left( \frac{dp_x}{dt}, \frac{dp_y}{dt} \right) \quad (8)$$

で与えられる(大きさ1に正規化)。

曲率は、軌道の起点からの道のりを $s$ として、微小区間 $\Delta s$ の間の接線方向ベクトルの変化 $\Delta d$ に対して、

$$\frac{1}{r} = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta d}{\Delta s} \right| \quad (9)$$

で与えられる。本研究では、 $t = t_0 - \Delta t, t = t_0 + \Delta t$ に対応する軌道点間の距離 $\Delta s$ と、対応する $d$ の差 $\Delta d$ により、数値計算で求めた。また、 $d$ と $\Delta d$ の関係から、曲率に負号を持たせ、台車の傾斜方向の正負を決定した。

### 3. 動作実験

以上の原理に基づき、2脚歩行ロボットに台車を取り付け、実験を行った。

#### 3.1 実験用ロボットの概要

##### 3.1.1 ロボットのハードウェア

ロボットの概要をFig. 10およびFig. 11に示す。本ロボットは全高400mm弱の、脚部のみを有する12自由度(DOF)の2脚歩行ロボットである。自由度配置は一般的なヒューマノイドロボットと同等で、股

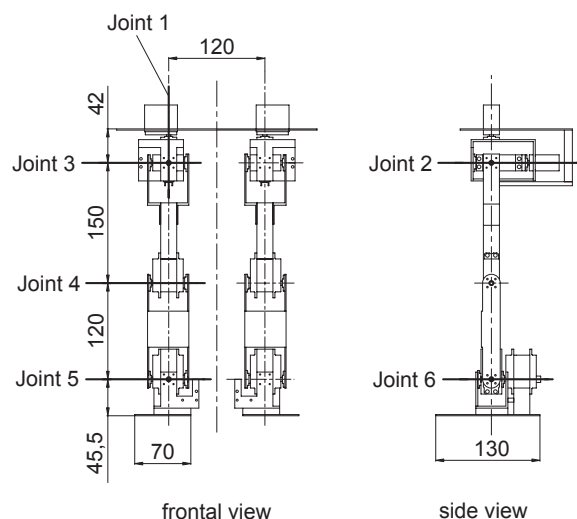


Fig. 10 2脚ロボットの設計図。一般的な6自由度を有する、小型のロボットである。

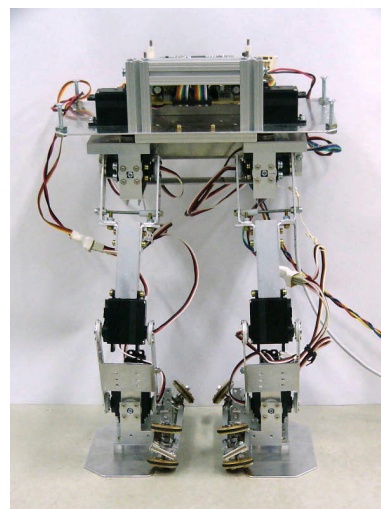


Fig. 11 2脚ロボットの外観。写真は腰を下げた直立姿勢であり、歩行などの基準姿勢である。

関節がyaw-roll-pitch軸(Joint 1,2,3)、膝関節がpitch軸(同4)、足首関節がpitch-roll軸(同5,6)で構成されている。アクチュエータにはロボット用に市販されているラジコンサーボ(近藤製 KRS-2350HV)を用いた。ラジコンサーボを採用したという点で市販のホビー用ロボットなどと類似するが、本ロボットは制御性を考慮して、本格的なロボット同様に股関節、足首関節は一点で関節軸が交わるように設計されている。

本ロボットの本体は機構部分のみである。電源



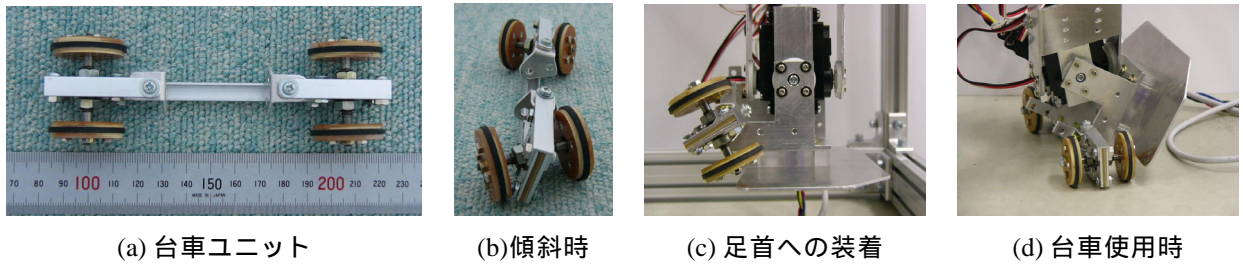


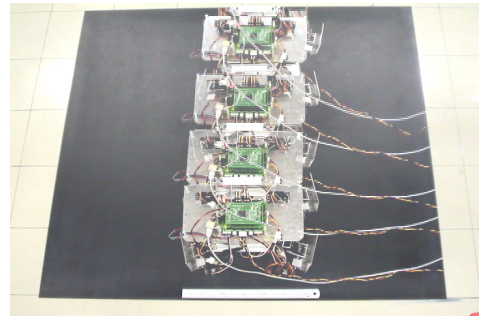
Fig. 12 2脚ロボットに取り付ける台車．ロボットの足首の内側に取り付けている．

は外部から12[V] 10[A](max)を供給している．写真にも見られるように上部にマイコン(秋月電子製 H8/3052マイコンボード)を搭載しているが，これはサーボとのインタフェースの役割のみを持ち，制御自体は別置のWindowsPC(Pentium4 3 [GHz])によって行っている．マイコンとPCはRS-232Cで接続しており，随時，関節角指令値などの情報の送受を行っている．Windowsはリアルタイム性に欠けるため，マイコンに早めに次期指令値を送信し，マイコン側でタイミングをとっている．

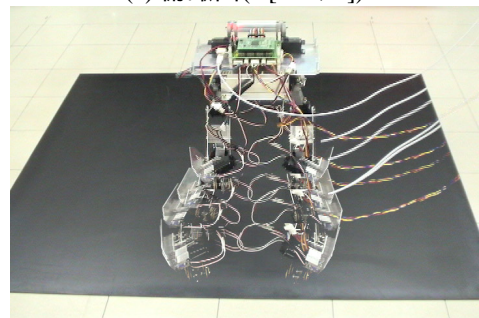
ロボットに装着する台車をFig. 12に示す．台車はロボットの足首の内側に斜めに取り付けた．これにより，通常の歩行時には地面に接することはなく，足首roll関節を60[deg]ほど傾斜させると台車を使用することができる．また，台車の操作軸が足裏の足首直下点と同じ位置関係になるように設計されており，歩行時と台車使用時で運動学演算を共用している(演算後，足首roll軸の指令値にオフセットを加えている)．なお，歩行状態と台車による運動の状態は，ロボット自身で容易に切り替え可能である．

### 3.1.2 制御方法

前述のように，制御は搭載マイコンと外置のPCによって行った．PC上ではリアルタイムに，足の位置(3DOF)，足裏の法線方向(2DOF)，足先のyaw角度(1DOF)を指令値として生成し，逆運動学演算によって関節角度の指令値とした．関節角度の指令値はRS-232C経由でマイコンに伝達し，指令パ



(a) 俯瞰図(1 [コマ/s])



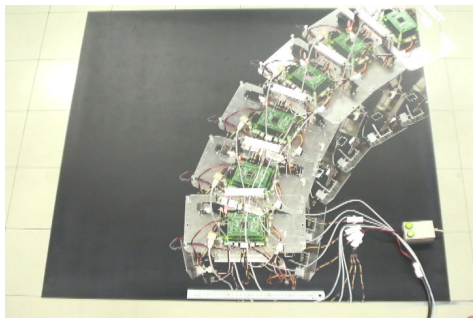
(b) 台車部の運動(2 [コマ/s])

Fig. 13 直線移動．両脚は対称に運動し，ともに同周期同振幅の正弦波軌道をとる．

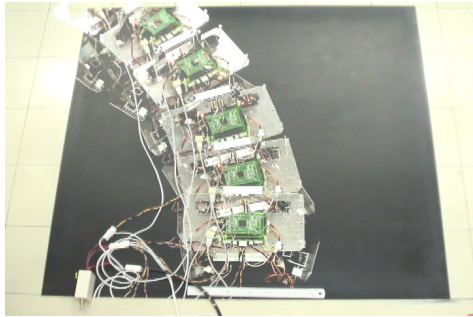
ルスに変換してラジコンサーボに与える．関節はサーボ自体の機能により位置制御されている．制御間隔は20[ms]であり，現状では姿勢センサ等によるフィードバックは行っていない．

### 3.2 動作実験

まず，原理を検証するために，直進運動を行わせた．運動を撮影した映像をもとに，1[s]ごとの動きを合成した写真をFig. 13(a)に示す．また，台車部分の動きを表す画像(0.5[s]ごと)を同(b)に示す．これらの運動でのパラメータは，脚の左右移動振幅20[mm]，1往復の間の直進距離  $90 \times 2\pi = 565$  [mm]，



(a) 右旋回(1[コマ/s])



(b) 左旋回(1[コマ/s])

Fig. 14 曲線移動．脚は円弧軌道に沿った2本の正弦波軌道を描くように制御した．

周期1.9[s]である．比較として，図の手前の定規は約300[mm]であり，床に敷いた板は1000[mm]四方である．この画像からは，1周期での前進が450[mm]程度と確認できる．

次いで，曲線を描いて運動できるかを検証するため，円弧を目標軌道とした．ロボット中心が半径800[mm]の円弧を描くように，直進と同条件で両脚台車の描くべき軌道を設定し，それに応じた進行方向や曲率を求め，脚を制御した．結果をFig. 14に示す．曲率および脚先方向はおおむね，正弦波を描くための周期的な成分と，円弧に沿った成分の和となり，内側の台車でより急な旋回が必要となる．右旋回はほぼ設計通りの円弧を描いているが，左旋回はずれが見られる．

また，軌道の進行方向を左右の台車で前後逆方向にすることで超信地旋回も可能と考え，試みたが，台車の最大曲率の制限を超えてしまうため，滑らかな運動は実現できていない．

### 3.3 結果の検討

以上の実験により，本手法の有効性が確認されたが，理論式と食い違いが見られた．その大きな要因は路面との滑りであるといえる．上記実験は比較的摩擦のある板材上で行った結果であるが，摩擦の劣るビニール張りの床面では，移動自体は十分可能であったものの，より多くの滑りがみられた．また，滑りのアンバランスにより方向が変わることもあった．本手法は滑らずに運動することを前提としているため，より摩擦の大きな車輪を使用するなどの解決が可能であり，必要である．

二つめの要因として，台車が平行になる近辺でのずれやすさが考えられる．ロボットは等速運動をするように軌道は設計してあるが，明らかに脈動的に走行した．台車が並行となるあたりでは軌道の変化も少なくなり，僅かな滑りで軌道からのずれが起きてしまう．今回は軌道として単純に正弦波を使用したが，むしろ直線+円弧といった，より台車の方向の違いがはっきりする区間を長くとれる軌道を検討したい．

三つ目の要因として，曲率の誤差が考えられる．足首の自由度の制約から，本ロボットでは曲率を操作しやすいように $\psi = 45[\text{deg}]$ としたが，これはロボットの剛性不足などで足首の角度が多少変わるだけで曲率が影響を受けやすいことも意味する．左右の曲率がアンバランスとなれば，直進を目標としても曲がることになる．ロボット自体をより高精度，高剛性とするか，足首の機構を工夫した上で $\psi$ を小さくする必要がある．

全般に，動作は台車の最大曲率(最小旋回半径)の制約をうける．ただ，あと少し曲率を大きくできれば，超信地旋回(その場旋回)が可能となると期待され，移動の自由度が増す．そのための改良を検討したい．

## 4. おわりに

本論文では，2脚ロボットの平地での高効率移動の手段としてローラーウォークの実現を目標として検討を行った．そのための要素機構として，傾けるだけで旋回曲率を変化させることが可能な台車を考案し，その特性として，傾斜角に曲率がほぼ変化する特性を持つことを明らかにした．これをロボットに取り付けて行った実験では，スムーズな直進と旋回運動を実現した．

これらの結果により，改良の方針も明らかとなったため，足首の修正とより多彩な運動の実現が今後の課題である．

最後に，ロボットの各部品の製作では東北学院大学工学部機械工場の方々の協力を得ていることをここに記し，謝意を表したい．

## 参考文献

- 1) 熊谷正俊, 高橋隆行, 庄司道彦, 中野栄二: 予測型イベントドリブン歩容による脚車輪分離型ロボットの不整地移動, 日本ロボット学会誌, 22-3, 400/410(2004)
- 2) 遠藤玄, 広瀬茂雄: ローラーウォーカーに関する研究 - 基本的運動の生成と自立推進実験 -, 日本ロボット学会誌, 18-8, 1159/1165(2000)
- 3) 日向野光康, 氏田祐, 田口幹: 2足スケータリングロボットBSR-1の研究, 日本機械学会ロボメカ部門 Robomec06, 講演番号1A1-D32(2006)